

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Andraž Požar

**Integracija digitalizatorja Acqiris
DC-252 v kontrolni sistem EPICS ter
implementacija algoritma za
računanje življenjske dobe skupkov
elektronov v sinhrotronu**

MAGISTRSKO DELO
MAGISTRSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: izr. prof. dr. Patricio Bulić

Ljubljana, 2015

AVTORSKE PRAVICE. Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

©2015 ANDRAŽ POŽAR

IZJAVA O AVTORSTVU MAGISTRSKEGA DELA

Spodaj podpisani Andraž Požar sem avtor magistrskega dela z naslovom:

Integracija digitalizatorja Acqiris DC-252 v kontrolni sistem EPICS ter implementacija algoritma za računanje življenjske dobe skupkov elektronov v sinhrotronu

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem magistrsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom izr. prof. dr. Patricia Bulića,
- so elektronska oblika magistrskega dela, naslov (slovenski, angleški), povzetek (slovenski, angleški) ter ključne besede (slovenske, angleške) identični s tiskano obliko magistrskega dela,
- soglašam z javno objavo elektronske oblike magistrskega dela v zbirki "Dela FRI".

V Ljubljani, 20. oktobra 2015

Podpis avtorja:

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil mentorju, izr. prof. dr. Patriciu Buliću, za njegovo odzivnost kljub nasičenem urniku in za vso pomoč, ki mi jo je nudil skozi pripravo magistrskega dela.

Andraž Požar, 2015

Contents

Povzetek	i
Abstract	iii
1 Uvod	1
2 Sinhrotronski pospeševalnik	3
2.1 Komponente sinhrotronskega pospeševalnika	4
2.2 O SSRF	9
3 Življenjska doba skupka elektronov v sinhrotronu	11
3.1 Sipanje	12
3.2 Življenjska doba skupka elektronov	13
4 Kontrolni sistem EPICS	15
4.1 Osnove EPICS	16
4.2 Sestavni deli kontrolnega sistema EPICS	17
5 Konkretna implementacija	25
5.1 Analiza zahtev	25
5.2 Strojna oprema	26
5.3 Uporaba programske knjižnice AsynDriver	28
5.4 Zgradba baze EPICS	29
5.5 Inicializacija in konfiguracija naprave	31
5.6 Vzorčenje podatkov in branje iz naprave	33

CONTENTS

5.7	Rekonstrukcija valovne oblike	33
5.8	Izračun naboja skupka elektronov	38
5.9	Računanje življenjske dobe skupkov elektronov	39
6	Sklepne ugotovitve	47

Povzetek

V magistrski nalogi je bil razvit algoritem za računanje življenjske dobe skupkov elektronov v sinhrotronu SSRF in integracija le-tega v kontrolni sistem EPICS. Poznavanje življenjske dobe vsakega skupka elektronov je zelo pomemben diagnostičen parameter, ki fizikom pove veliko o kvaliteti shranjevalnega obroča sinhrotronskega pospeševalnika. Glavni problem pri razvoju rešitve je bil, da elektroni v sinhrotronu potujejo s skoraj svetlobno hitrostjo, skupki elektronov pa so dokaj kratki. Najkrajši razmak med dvema skupkoma je zgolj 2 ns, širina pulza pa le nekaj sto piko sekund. Trenutno na tržišču ni strojne opreme, ki bi lahko ob le enem prehodu skupka elektronov zajela dovolj vzorcev za zadovoljiv izračun življenjske dobe. Posledično je bilo potrebno problem rešiti na programskem nivoju ter zagotoviti dovolj dober in hiter algoritem, ki lahko v sorazmerno kratkem času računa življenjsko dobo vsakega skupka elektronov. Izračun se izvede na podlagi vzorcev zajetih preko več obhodov skupka združenih v eno valovno obliko. S to informacijo lahko fiziki in inženirji zadolženi za nadzor nad kvaliteto shranjevalnega obroča lažje razumejo kje so problemi in jih posledično lažje odpravijo.

Ključne besede

Kontrolni sistemi, EPICS [1], pospeševalnik delcev, fizika osnovnih delcev, življenjska doba skupkov elektronov, rekonstrukcija signala, Kalmanov filter, drseče povprečje, prileganje eksponentne funkcije

Abstract

In the scope of Master's thesis, an algorithm has been developed for calculation of bunch-by-bunch lifetime in SSRF synchrotron and has been integrated into the EPICS control system. Being familiar with the lifetime of each bunch is a very important diagnostic parameter which provides a lot of information about the quality of the synchrotron storage ring to the physicists. The main obstacle in the development of the solution has been the speed electrons travel with, which is very close to the speed of light. Consequently that makes bunches to be very short. Smallest gap between two bunches is therefore only 2 ns while the width is measured in a couple of hundreds of picoseconds. The market does currently not provide equipment which could acquire a sufficient amount of samples in one passing of the bunch to calculate reliable lifetime information. Therefore, the solution had to be developed in software layer with an algorithm that is fast enough to calculate the lifetime in relatively short time. The calculation is executed based on the samples acquired over many passings of a bunch which are then combined in a single waveform. With this information, physicists and engineers in charge of quality of the storage ring can more easily understand where the problems lie and are consequently able to fix them.

Keywords

Control systems, EPICS [1], particle accelerator, particle physics, electron bunch lifetime, signal reconstruction, Kalman filter, sliding average, exponential function fitting

Poglavje 1

Uvod

V okviru sodelovanja med podjetjem Cosylab [2] in kitajskim inštitutom Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP) [3], pod okrilje katerega spada tudi Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) [4], sem razvil algoritem za računanje življenjske dobe skupkov elektronov. Algoritem sem razvil za potrebe diagnostike sinhrotronskega pospeševalnika SSRF.

Algoritem deluje na podlagi podatkov pridobljenih iz digitalizatorja Acqiris DC-252 [5], ki vzorči napetost inducirano na monitorju profila žarka v shranjevalnem obroču sinhrotronskega pospeševalnika. Poznavanje življenjske dobe posameznega skupka elektronov je ključnega pomena za diagnostično skupino, ki deluje na pospeševalniku, ker ji ta podatek omogoča natančnejši vpogled v dogajanje v žarku elektronov.

Algoritem in podporo za komunikacijo z digitalizatorjem sem integriral v kontrolni sistem Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) [1]. EPICS je osrednji kontrolni sistem, ki se uporablja na SSRF-ju, zaradi česar je bila integracija v ta sistem najprimernejša. S tem sem zagotovil, da lahko operaterji oziroma ostali inženirji zainteresirani za informacije o življenjski dobi skupkov elektronov do le-te dostopajo preko njim dobro poznane uporabniškega vmesnika iz oddaljene naprave. Integracija v kontrolni sistem EPICS omogoča tudi pridobivanje vrednosti, ki so potrebne za izračun življenjske dobe iz drugih modulov kontrolnega sistema, kot je na

primer radio-frekvenčna komora.

V Poglavju 2 bom pričel s predstavitvijo osnovnih konceptov sinhrotron-skih pospeševalnikov in opisom nekaterih sestavnih komponent le-teh. Nadaljeval bom s poglavjem Poglavjem 3, kjer bom podal konceptualno razlago življenjske dobe skupkov elektronov in razloge za izgubo elektronov iz skupkov. Na kratko bom opisal tudi karakteristike sinhrotronskega pospeševalnika SSRF. V Poglavju 4 bom na grobo predstavil kontrolni sistem EPICS in vanj vključeno osnovno programsko opremo. V Poglavju 5 bosta sledili razlagi konkretne integracije digitalizatorja v kontrolni sistem EPICS in implementacije algoritma. Zaključil bom s Poglavjem 6, z opisom rezultatov izvajanja algoritma in samih možnosti za nadaljnje izboljšave.

Poglavje 2

Sinhrotronski pospeševalnik

Poznamo več oblik krožnih pospeševalnikov. Ena izmed njih je tudi sinhrotronski pospeševalnik, ki je do tega dne tudi najsodobnejši izmed vseh oblik. Kot že samo ime pove je namenjen pospeševanju. V njem se pospešujejo nabiti delci, navadno elektroni, do hitrosti, ki je zelo blizu svetlobni hitrosti. Ker je svetlobna hitrost za delce z maso nedosegljiva, si znanstveniki prizadevajo, da bi se ji čimbolj približali.

Aplikacije pospešenih delcev so različne od naprave do naprave, skupna pa jim je uporaba za fizikalne eksperimente. Delce, ki so usmerjeni v eno stran lahko trkajo v curek, ki gre v nasprotno stran ali pa jih usmerjajo v statično tarčo. Okrog mesta, kjer trka trčita ali pa tarče, je navadno postavljenih veliko detektorjev ki beležijo dogajanje ob eksperimentu.

Ker je sinhrotronski pospeševalnik eden izmed krožnih oblik pospeševalnika, je potrebno nabite delce voditi po krožnici. To pomeni, da potrebujemo magnetne, ki delce usmerjajo. Stranski produkt usmerjanja delcev je sinhrotronska svetloba, ki ima zelo zanimive lastnosti za izvajanje fizikalnih poskusov - veliko intenziteto in širok spekter. Te lastnosti jo naredijo izjemno primerno za veliko različnih eksperimentov in raziskav, ki se uporabljajo za napredek znanosti in industrije.

karakteristike/sinhrotronski sistem	SSRF	SLSA	SLS	DLS
Končna energija [GeV]	3,5	3,0	2,4	3,0
Tok [mA]	200-300	200	400	300
Obseg [m]	432	216	288	562

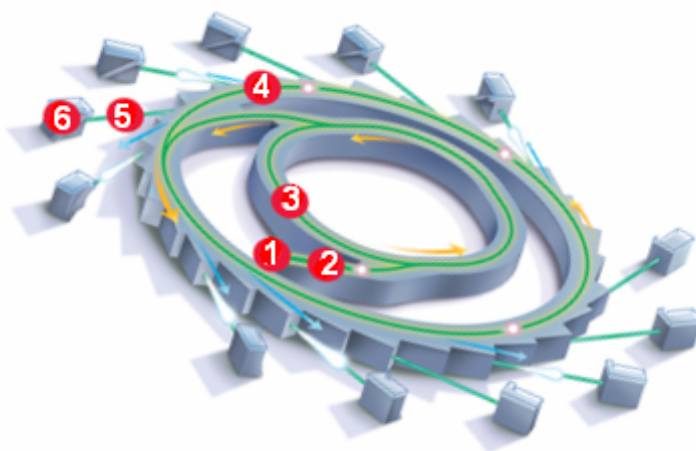
Tabela 2.1: Primerjava sodobnih sinhrotronskih pospeševalnikov SSRF [4] (Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai, Kitajska), SLSA [6] (Synchrotron Light Source Australia, Melbourne, Avstralija), SLS [7] (Swiss Light Source, PSI Viligen, Švica), DLS [8] (Diamond Light Source, Chilton, Velika Britanija).

2.1 Komponente sinhrotronskega pospeševalnika

Sistem sinhrotronskega pospeševalnika je sestavljen iz več delov. Delci so najprej pospešeni v linearnem pospeševalniku do določene začetne energije. Dokončno se pospešijo v krožnem sinhrotronskem (pred)pospeševalniku, nato pa se dodajo v shranjevalni obroč, kjer se njihova hitrost le še ohranja. V primeru, da se sinhrotronski pospeševalnik uporablja z namenom izrabe sinhrotronske svetlobe, se le-to do eksperimentalnih postaj pripelje preko žarkovnih linij (Slika 2.1). Osnovne karakteristike nekaterih sinhrotronskih sistemov so prikazane v Tabeli 2.1.

2.1.1 Linearni pospeševalnik

Delci so v linearni pospeševalnik dodani z uporabo vira delcev. V primeru, da gre za elektrone, se ta vir poimenuje elektronska puška. Delci nato potujejo skozi serijo radio-frekvenčnih komor, ki ustvarjajo potencial, ki je potreben za pospešitev delcev. Pospešeni delci imajo na koncu linearnega pospeševalnika energijo reda velikosti 100 MeV [10]. V sinhrotronskem sistemu linearni pospeševalniki služijo za začetno pospešitev delcev, ki so dodatno pohitreni v sinhrotronskem pospeševalniku, zato jih navadno imenujemo linearni predpospeševalniki [11].



Slika 2.1: (1) elektronska puška, (2) linearni pred-pospeševalnik, (3) sinhrotronski pospeševalnik, (4) shranjevalni obroč, (5) žarkovna linija, (6) eksperimentalna postaja [9].

2.1.2 Sinhrotronski pospeševalnik

Na nivoju pospeševanja delcev in vzdrževanja njihove hitrosti lahko sinhrotronske sisteme ločimo na dve konfiguraciji.

V prvem primeru imamo sinhrotronski pred-pospeševalnik, kjer se delci pospešijo do končne energije in se nato vbrizgajo v shranjevalni obroč, kjer se njihova energija le še ohranja (*top-up injection*). Cilj shranjevalnega obroča je torej kompenzacija energijskih izgub. Ko energija pade pod določeno vrednost, se iz sinhrotronskega pred-pospeševalnika vbrizgajo novi delci, s čimer se zagotovi kar se da konstantna energija delcev in posledično svetloba, ki je namenjena uporabnikom.

V drugi konfiguraciji pospeševanje opravlja tudi shranjevalni obroč. Delci se v sinhrotronskem pred-pospeševalniku pospešijo do neke vmesne energije, do končne pa nato v shranjevalnem obroču. Ta način delovanja ne potrebuje vbrizgavanja novih pospešenih elektronov, kar znatno zniža ceno naprave, vendar pa ne omogoča neprekinjenega delovanja.

Za pravilno delovanje sinhrotronskega pospeševalnika je potrebno poskr-

beti za:

- odstranitev ovir iz poti delcev,
- pospeševanje delcev,
- vodenje delcev po sklenjeni poti.

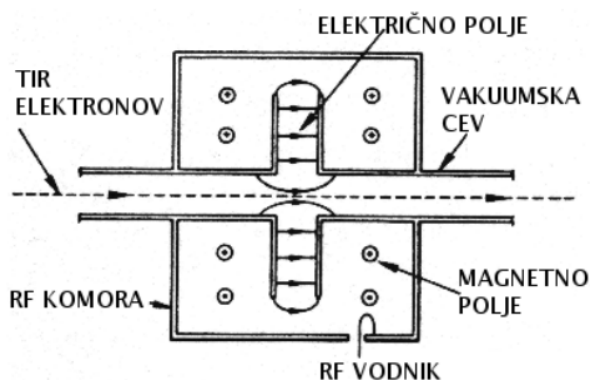
Ovire se za delce pojavljajo v obliki atomov in molekul. Poskrbeti je potrebno, da je le-teh čim manj, oziroma, v idealnem primeru, nič. Tirnica delcev je zato postavljena v notranjost evakuirane cevi, navadno, iz nerjavečega jekla. Na to cev je priključenih veliko vakuumskih črpalk, ki vzdržujejo v cevi kar se le da nizek tlak.

Delci so pospešeni v radio-frekvenčnih komorah. Elektromagnetno valovanje, navadno v območju nekaj 100 MHz, pride do teh preko valovnega vodnika. Zaradi oblike komore se v njej vzpostavi oscilirajoče elektromagnetno polje, pri čemer je jakost električnega polja vzporedna s potjo delcev (Slika 2.2). Idealno, delec preleti komoro v optimalnem časovnem intervalu glede na fazo električnega polja in se na tak način pospeši.

Od dolžine intervala v katerem se delci pospešijo, je odvisna tudi maksimalna dolžina skupine delcev imenovane skupek, ki se lahko pospešijo v enem obhodu. Glede na to, da je električno polje periodično, imamo lahko v pospeševalniku več skupkov hkrati, ki se pospešijo ob vsakem obhodu [10].

Tir delcev je v sinhrotronskem pospeševalniku konstanten. Da bi to dosegli, je potrebno zagotoviti močnejše magnetno polje pri naraščajoči energiji delcev. Jakost magnetov torej sinhrono raste za naraščajočo energijo delcev in prav po tem je ta vrsta pospeševalnika tudi dobila svoje ime[10].

Da bi delce ohranili znotraj vakuumске cevi, ni dovolj, da jih le usmerjamo v zavojih, saj ima žarek tudi končno širino in je podobno, kot žarek svetlobe, divergenten. Podatek o divergenci žarka je zelo pomemben, ker se lahko iz njega izračuna *emitanca* - produkt začetne širine žarka in njegove divergence. Emitanca je eden pomembnejših parametrov za oceno kvalitete sinhrotronskega sistema. Da bi bila emitanca čim manjša, je žarek potrebno fokusirati. V ta namen se uporabijo magnetne leče, ki so v bistvu sistem



Slika 2.2: Shema radio-frekvenčne komore[10].

magnetov, mimo katerih potuje žarek. Uporabljajo se kvadrupolni magneti, ki žarek v eni dimenziji ožijo v drugi dimenziji pa širijo, zato je zaporedje teh magnetov potrebno za dobro fokusiranje [12].

Podobno kot pri curku svetlobe, imamo tudi pri curku delcev napake leč. Ker je lomni količnik stekla odvisen od valovne dolžine, je tudi gorišče za različne barve različno. Ta pojav se imenuje *kromatična aberacija* [13]. Tu lahko povežemo analogijo z žarkovno optiko pospeševalnika, kjer je goriščna razdalja kvadrupolnega magneta obratno sorazmerna z energijo delcev. Zaradi tega so delci, ki imajo večjo energijo, šibkeje fokusirani od tistih, ki imajo nižjo energijo [10]. Glede na to, da vsi delci ne pridejo v radio-frekvenčno komoro ob enakem času, ni mogoče doseči, da bi bili vsi enako pospešeni, kar vpliva na razliko v energijah med delci. Za namen zmanjševanja posledic kromatične aberacije, se v sinhrotronskem pospeševalniku uporabljajo magneti višjih redov, najpogosteje sekstupoli [12].

Glede na to, da je od energije delca odvisen vpliv magnetnega polja magnetov v evakuirani cevi, se ta pojav kaže tudi pri usmerjanju delcev s pomočjo dipolnih magnetov. Pri usmerjanju zaradi različnih energij delcev pride do horizontalnega razmaza žarka, kar imenujemo *disperzija*. Zaradi omenjenega pojava lahko pride do velikih izgub delcev, ki se zaradi preve-

like ali premajhne energije iztirijo iz idealne poti in zadenejo vakuumsko cev. Disperzijo se zmanjšuje z uporabo *akromatičnih lokov*. Akromatični lok je sistem magnetov, ki ga sestavljajo dipolni, kvadrupolni in sekstupolni magneti. S tem sistemom dosežemo, da ob zavoju delci vedno zapustijo sistem v središču vakuumske cevi, ne glede na njihovo energijo ob vstopu v zavoj [10].

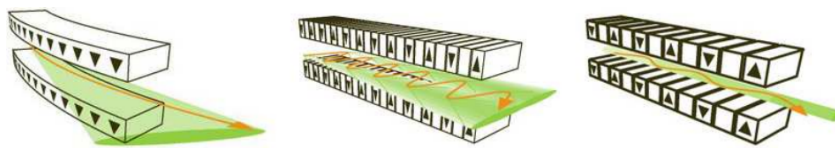
Enota za vbrizg se nahaja na enem izmed ravnih odsekov med akromatičnimi loki. Na tem mestu se iz linearne pred-pospeševalnika vbrizgajo novi delci v sinhrotronski pospeševalnik. V drugem ravnem odseku se nahaja ekstrakcijska enota, ki pospešene delce izloči v shranjevalni obroč.

2.1.3 Shranjevalni obroč in žarkovne linije

V zavojih delci izgubljajo energijo v obliki fotonov. V primeru, da je magnetno polje dovolj močno, sevajo visoko-energijski elektroni zvezni spekter. Ta ima razpon od infrardeče svetlobe do trdih rentgenskih žarkov in intenziteto, ki je veliko večja od tiste pri rentgenskih ceveh.

Glavni zadolžitvi shranjevalnega obroča sta vzdrževanje energije delcev, ki so bili s končno energijo vbrizgani vanj in kompenziranje energijskih izgub, do katerih pride v zavojih na dipolnih magnetih. Po sami zgradbi in elementih je shranjevalni obroč zelo podoben sinhrotronskemu pospeševalniku. Glavna razlika med njima je v tem, da ima shranjevalni obroč, na mestu kjer so postavljeni dipolni magneti, izhode iz vakuumske cevi po katerih se fotoni, ki so izsevani v zavojih preko žarkovnih linij, prenesejo do eksperimentalnih postaj.

Podobno kot sinhrotronski pospeševalnik, vsebuje tudi shranjevalni obroč na enem izmed ravnih odsekov med akromatičnimi loki enoto za vbrizg novih delcev iz sinhrotronskega pospeševalnika. Enote za ekstrakcijo v shranjevalnem obroču ni, ker je to zadnji element v sinhrotronskem sistemu. Dodatno, pa ima lahko shranjevalni obroč na ravnih odsekih dodatne magnetne za pridobivanje svetlobe. V tem primeru gre navadno za niz permanentnih magnetov, kjer se smer magnetnega polja spreminja vzdolž vakuumske cevi. Dve široko uporabljeni obliki takih magnetov sta; *wiggler*, ki oddaja zvezni spekter sve-



Slika 2.3: Sistemi za pridobivanje sinhrotronske svetlobe, od leve proti desni: dipolni magnet, wiggler, undulator [6].

tlobe; in *undulator*, ki povzroča interferenco ter posledično vrh pri določenih valovnih dolžinah [14].

2.2 O SSRF

Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) [4] je začel obratovati maja 2009, je trenutno najnaprednejša naprava te vrste na Kitajskem in spada v tretjo generacijo svetlobnih virov za znanstvene eksperimente, ki naj bi zadovoljila vse potrebe po svetlobi za Kitajske uporabnike.

Do sedaj je zagotavljal svetlobo več kot 10.000 znanstvenikom iz različnih naravoslovnih smeri, kot so biologija, kemija, fizika in druge. S svetlobo, ki jo proizvaja SSRF je bilo opravljenih že veliko število eksperimentov in objavljenih več kot 1.900 strokovnih publikacij.

SSRF je sestavljen iz linearne pred-pospeševalnika, ki pospeši elektrone do energije 150 MeV, sinhrotronskega pred-pospeševalnika, ki jih nadaljnje pospeši do 3,5 GeV (Tabela 2.1) in shranjevalnega obroča, ki to energijo vzdržuje. Maksimalni tok v shranjevalnem obroču je lahko 300 mA oziroma 5 mA na en skupek elektronov, emitanca je 3,9 nm-rad, obseg pa 432 m. SSRF uporablja prej omenjeni top-up injection, kar pomeni, da se delci v shranjevalnem obroču ne pospešujejo več, temveč se vzdržuje le njihova hitrost s pomočjo radio-frekvenčnih komor, ki ustvarjajo valovanje s frekvenco malo manj kot 500 MHz. Vzdrževanje naboja in posledično toka skupkov elektronov se realizira z dodajanjem novih skupkov elektronov iz sinhrotron-

skega pred-pospeševalnika.

Shranjevalni obroč SSRF lahko vsebuje maksimalno 720 skupkov elektronov. Časovni razmak med njimi je 2 ns, dolžina enega pa se meri v nekaj sto piko sekundah.

Poglavje 3

Življenjska doba skupka elektronov v sinhrotronu

Potrebno je razumeti, da obstaja razlika med življenjsko dobo skupka elektronov v sinhrotronu in življenjsko dobo enega samega elektrona. Življenjska doba elektrona je namreč odvisna le od njegove hitrosti in je zelo visoka (Tabela 3.1). Pri skupku elektronov pa je opazovani parameter elektrostatični naboj in posledično tok celotnega skupka, ki je odvisen od števila elektronov v skupku. Do zmanjševanja naboja pride zaradi pojava imenovanega sipanje.

delec	srednja vrednost življenjske dobe
elektron	$> 4,6 \times 10^{26} \text{ let}$
nevtron	$885,7 \text{ sekund}$
proton	$> 10^{29} \text{ let}$

Tabela 3.1: Srednje vrednosti življenjske dobe elektrona, nevtrona in protona

3.1 Sipanje

Sipanje je pojav, ki povzroči spremembo poti delca in ga med drugim delimo na elastično ali neelastično sipanje. Elastično sipanje je pojav, pri katerem se delcu spremeni smer, vendar delec ohrani hitrost in energijo. Nasprotno, je neelastično sipanje pojav, pri katerem delec zaradi sipanja izgubi hitrost in energijo ali pa se popolnoma ustavi.

V primeru sinhrotrona imata najpomembnejšo vlogo (1) Rutherfordovo sipanje, ki nastaja zaradi nepopolno evakuirane cevi, kjer preostali atomi ali molekule plina predstavljajo ovire na poti žarka elektronov in (2) Tousche-kovo sipanje [15] oziroma elektron-elektron efekt. Posledica sipanj je izguba elektronov v skupku, s tem pa zmanjševanje naboja, kar povzroča nižjo intenziteto svetlobe, ki je namenjena znanstvenim poizkusom.

Celoten shranjevalni obroč je umerjen, da usmerja in pospešuje skupke z določen premerom, dolžino in energijo. Tako se lahko na primer tirnica elektrona, ki je izgubila energijo zaradi sipanja, v dipolnem magnetu preveč ukrivi in zadane elektron v steno evakuirane cevi. Nasprotno, se lahko tirnica delca, ki ima preveč energije ne ukrivi dovolj in je delec ponovno izgubljen.

Tudi v primeru elastičnega sipanja, ko delec ne izgubi energije in je le odmaknjen od načrtovane pozicije skupka, se lahko izgubi. Ko delec vstopi v radio-frekvenčno komoro, ni več v idealnem položaju za pospeševanje in posledično ne pospeši ali pa celo zavre. To povzroči, da je elektron vedno bolj odmaknjen od skupka in začne izgubljati energijo, zaradi česar se na dipolnem magnetu s časom iztiri.

3.1.1 Rutherfordovo sipanje

Rutherfordovo sipanje je primer elastičnega sipanja nabitega delca po Coulombovem zakonu. Je fizikalni fenomen razložen leta 1911 s strani Ernesta Rutherforda, ki je bil povod za kasnejšo postavitev Rutherfordovega planetarnega modela atoma in pozneje Bohrovega modela. Rutherfordovo sipanje je bilo sprva imenovano Coulombovo sipanje, ker je elektrostatična (Coulom-

bova) sila med dvema nabitima delcema razlog za omenjeni fizikalni fenomen.

Do omenjenega sipanja pride, ko se nabit delec zelo približa nekemu atomu. Ker ima jedro atoma pozitiven naboj, se pot delcu, ki se jedru dovolj približa, spremeni. V primeru shranjevalnega obroča kjer imamo elektrone, jedro ukrivi tirnico elektronu v smeri jedra ali jo celo obrne za 180° [16].

3.1.2 Tauschekovo sipanje

Shranjevalni obroč vsebuje veliko magnetov za fokusiranje skupkov elektronov. To je ključnega pomena za njihovo pospeševanje in usmerjanje, saj morajo biti v pravem trenutku na pravem mestu, ko vstopijo v radio-frekvenčno komoro ali magnet. Logična posledica stiskanja elektronov je ta, da so elektroni zelo skupaj. Glede na to, da so elektroni negativno nabiti, med njimi deluje odbojna elektrostatična sila, ki jih sili narazen. Ko prideta zaradi stisnjenosti skupka dva elektrona preveč skupaj, ima lahko to nezaželene posledice. Elektrona se lahko izbijeta iz idealne tirnice skupka, lahko pa tudi pride do prenosa energije med njima. V vsakem primeru elektrona nista več na načrtovani poziciji ali pa nimata več načrtovane energije [17].

3.2 Življenjska doba skupka elektronov

Posledica Rutherfordovega (glej 3.1.1) in Tauschekovega (glej 3.1.2) sipanja je izguba elektronov v skupku in posledično zmanjševanje naboja skupka elektronov.

Življenjska doba skupka elektronov τ je definirana kot vsota inverzov prispevkov sipanj v shranjevalnem obroču. Če imamo i prispevkov je definirana kot

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{1}{\tau_i} \quad (3.1)$$

[15]. V našem primeru lahko torej govorimo o dveh prispevkih. Rutherfor-

dovem in Touschekovem, kar nam da sledečo enačbo

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{Rutherford}} + \frac{1}{\tau_{Touschek}}. \quad (3.2)$$

Za nadaljevanje je potrebno vedeti tudi, da v poenostavljenem modelu življenjski čas skupka elektronov pada eksponentno v odvisnosti od časa [18].

3.2.1 Pomen poznavanja življenjske dobe skupka elektronov

Že od začetka sinhrotronskih pospeševalnikov je bilo poznavanje življenjske dobe žarka elektronov ena izmed ključnih informacij o kvaliteti naprave. Odražala je kvaliteto vakuumu in umerjenost magnetov ter časovno natančnost sistema za pospeševanje. Z napredovanjem tehnologije je sedaj mogoče izračunati življenjsko dobo posameznega skupka elektronov. To nam da natančnejši vpogled v kvaliteto izdelave in sinhronizacije. Na podlagi življenjske dobe posameznega skupka elektronov je mogoče prepoznati tudi morebitne nepravilnosti pri dodajanju novih elektronov v skupek v shranjevalnega obroča iz sinhrotronskega pred-pospeševalnika.

Življenjska doba je danes eno pomembnejših diagnostičnih orodij sinhrotronskega pospeševalnika, ki samo po sebi sicer ne poda razloga za nepravilnosti v napravi, lahko pa opozori na le-te.

Poglavje 4

Kontrolni sistem EPICS

Vse velike fizikalne naprave zahtevajo zelo natančno krmiljenje in sinhronizacijo za optimalno delovanje. V primeru sinhrotronskega pospeševalnika ni nič drugače. Glede na to, da so hitrosti do katerih so pospešeni delci zelo blizu hitrosti svetlobe, je nujno, da je kontrolni sistem zelo natančen in brezhiben.

Kompleksne naprave kot so to pospeševalniki, so sestavljene iz zelo velikega števila naprav, tudi po več tisoč. Te naprave same po sebi niso preveč uporabne, če niso v pravem času pravilno nastavljene. Glede na to, da ima lahko vsaka naprava po nekaj deset ali sto nastavljenih parametrov, je orkestriranje celotnega sistema velik zalogaj. Naivno, individualno krmiljenje naprav je sicer izvedljivo, vendar časovno zelo potratno, kompleksno in velikokrat nezanesljivo ter nepregledno.

V ta namen so bili razviti kontrolni sistemi, ki naj bi olajšali pregled nad parametri naprav in lažje usklajevanje le-teh. Taki sistemi ponujajo tudi okolja za izdelavo uporabniških vmesnikov za operaterje, shranjevanje vrednosti parametrov in meritev v podatkovno bazo ter s tem časovno sledljivost.

Pri izbiri kontrolnega sistema se vzame v obzir več parametrov, kot so: podpora stroke, cena licenc, razširjenost uporabe, hitrost razvoja, kompetence znotraj organizacije, izkušnje, priporočila strokovnih kolegov, itd.

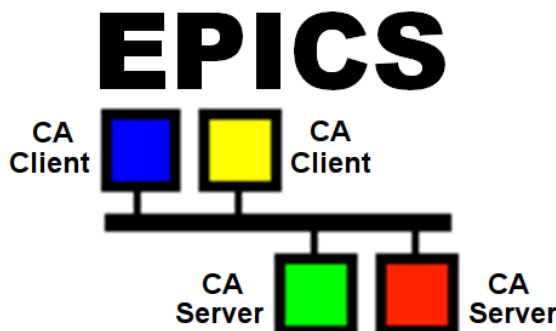
4.1 Osnove EPICS

Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) je skupek odprtokodnih programov, knjižnic in aplikacij za kreiranje distribuiranega kontrolnega sistema, ki deluje znotraj mehke definicije realnega časa in je bil prvotno namenjen uporabi na velikih fizikalnih projektih kot so pospeševalniki delcev in teleskopi [1].

EPICS se je začel razvijati pod okriljem Los Alamos National Laboratory (LANL) [19] in Argonne National Laboratory (ANL) [20], kmalu pa je navdušil širšo skupnost in kolaboraciji so se pridružili tudi številni drugi laboratoriji širom sveta. EPICS je navdušil s svojo stabilnostjo, prosto dostopno kodo, enostavnostjo in veliko podporo skupnosti. Ne gre zanemariti tudi dejstva, da je popolnoma brezplačen. Ob množičnejši uporabi se je hitro razvijal in kmalu postal vodilni kontrolni sistem na področju velikih fizikalnih naprav.

Temu v prid kaže tudi delni seznam laboratorijev in inštitutov, ki uporabljajo kontrolni sistem EPICS [1]:

- Advanced Photon Source (APS) at Argonne National Laboratory (ANL)
- Australian Synchrotron
- Berlin Electron Synchrotron (BESSY II)
- Brazilian Synchrotron Light Source (LNLS)
- Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY)
- Diamond Light Source
- Fermilab (FNAL)
- Gemini Observatory
- ITER project, France
- Jefferson Laboratory (JLAB)



Slika 4.1: Logotip in ob enem mrežna shema kontrolnega sistema EPICS [1]

- Keck Observatory
- KEK B-Factory

Distribuiran sistem takih razsežnosti je načeloma sestavljen iz velikega števila računalnikov. Zaradi potrebe po komunikaciji in usklajevanju so ti računalniki povezani v mrežo preko katere ima lahko vsak računalnik dostop do ostalih računalnikov, meritev in nastavitev. Ta način omogoča tudi operaterjem, da si ogledajo parametre iz kontrolne sobe in jih po potrebi prilagajajo.

Za namene zmanjševanja kompleksnosti in prometa na mreži, za pregled parametrov EPICS uporablja način *odjemalec-strežnik*. To pomeni, da odjemalec od strežnika izrecno zahteva podatke in jih nato dobi. Omogočen je tudi način *publish-subscribe*, kjer se odjemalec naroči na obveščanje o spremembi določenega parametra in ga na strežnik ob vsaki spremembi o tem obvesti.

4.2 Sestavni deli kontrolnega sistema EPICS

4.2.1 Channel Access

Za potrebe specifične komunikacije, kjer je poudarek na visoki prepustnosti podatkov, je bil v sklopu kontrolnega sistema EPICS razvit Channel Access

(CA) [21, 22] mrežni protokol, ki je v osnovi nadgradnja TCP/IP protokola. Prav zaradi CA je mogoče, da je na eni mreži aktivnih tolikšno število računalnikov hkrati. Preko CA poteka celotna komunikacija med strežniki in odjemalci. Odjemalci se tako v kontrolnem sistemu imenujejo *Channel Access klienti*, strežniki pa *Channel Access strežniki*. Od tu izvira tudi shema v logotipu kontrolnega sistema EPICS (Slika 4.1).

4.2.2 IOC

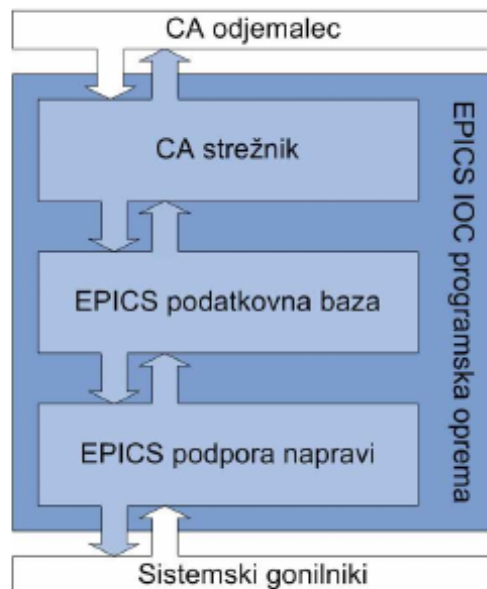
Del Channel Access strežnikov, ki so navadno imenovani IOC (Input/Output Controllers [23]), komunicira z napravo. To lahko pomeni nastavljanje registrov naprave in s tem njeno kontroliranje ali branje zajetih podatkov iz naprave. Vendar pa ni nujno potrebno, da krmilnik IOC dejansko komunicira z napravo. IOC lahko vsebuje le podatkovno bazo EPICS, kjer opravlja določene kalkulacije ali pripravlja podatke za operatorske vmesnike (Operator Interface - OPI). V splošnem IOC obsega podatkovno bazo EPICS in EPICS podporo napravi v kolikor je to potrebno (Slika 4.2).

Baza EPICS

Podatkovna baza EPICS je najpomembnejši in osnovni del vsakega krmilnika IOC. Baza je sestavljena iz zapisov (*record* [24]). Vsak zapis vsebuje veliko nastavljivih parametrov, vendar pa niso vsi na voljo vsem vrstam zapisov. Nekaj primerov vrst zapisov v podatkovni bazi EPICS:

- AO (*analog output*)

Ta tip zapisa se navadno uporablja za izpis vrednosti na digitalno-analogni pretvornik. Uporabljen je za vse analogne izhode do strojne opreme. Lahko se uporablja tudi za pisanje števil v plavajoči vejici v druge zapise v podatkovni bazi EPICS. Kam bo zapisana vrednost tega zapisa, pa je odvisno od tega, kako razvijalec nastavi ostale parametre zapisa.



Slika 4.2: Osnovna shema programskih komponent EPICS IOC

- AI (*analog input*)
Nasprotno od AO, se ta zapis navadno uporablja za pridobivanje vrednosti iz strojne opreme.
- BI (*binary input*)
Zapis za pridobivanje binarne vrednosti od naprave ali drugega zapisa
- BO (*binary output*)
Zapis za nastavljanje binarne vrednosti napravi ali drugemu zapisu
- CALC (*calculator*)
Zapis za računanje. Ta zapis vsebuje 12 nastavljljivih parametrov, kjer se lahko iz različnih zapisov berejo vrednosti v plavajoči vejici in parameter s pravilom za izračun rezultata iz teh nastavljljivih parametrov.
- SUB (*subroutine*) Zapis za izvajanje podrutine. Ta zapis se navadno uporablja za izvajanje kompleksnejših računanj ali za implementacijo

podpore napravi, saj lahko preko njega dostopamo do kode, ki je napisana v programskem jeziku C ali C++.

Vsak izmed zapisov v bazi ima svoje enolično ime. Sestava tega imena je v domeni posameznega inštituta, laboratorija in navadno odraža kateri napravi pripada ta IOC, v katerem delu kontrolnega sistema se nahaja in kakšno funkcijo opravlja. Glede na to, da je lahko v nekem kontrolnem sistemu več naprav enakega tipa kjer vsaka potrebuje svoj IOC, je mogoče v ime zapisa vključiti makroje (npr. $\$(deviceName):StorageRing:StartDataAcquisition$). Ob zagonu krmilnika IOC, se ti makroji nadomestijo s pripravljenimi dejanskimi vrednostmi, ki so lahko podane v datoteki imenovani *template* ali v skripti, ki zažene IOC. Poleg imena ima vsak zapis veliko nastavljenih parametrov za katere mora poskrbeti razvijalec podatkovne baze. Tu bom opisal le nekaj izmed parametrov, ki so skupni večini zapisom:

- INP (*Input Link*)

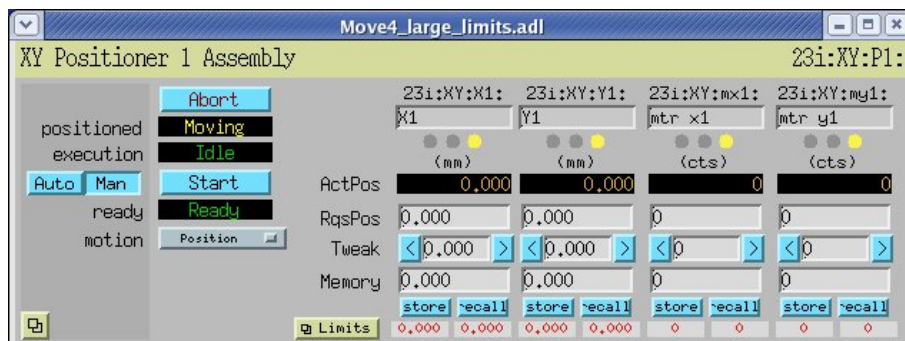
V primeru, da je zapis uporabljen za podporo napravi, se vrednost tega parametra uporablja v rutini, ki se izvrši za informacijo iz katerega zapisa v bazi naj pridobi vrednosti vhoda zapisa. V primeru, da ne gre za podporo napravi, je to lahko konstantno število, ki se uporabi pri računanju ali podajanju informacije ostalim zapisom.

- VAL (*Value*)

To je končna vrednost zapisa. Po tem, ko so bile že opravljene morebitne konverzije in računanja.

- OUT (*Output Link*) V primeru, da je zapis uporabljen za podporo napravi, se vrednost tega parametra uporablja v rutini, ki se izvrši za informacijo o tem, na kateri zapis naj se shrani izračunana vrednost v rutini. V primeru, da ne gre za podporo napravi, je to ime zapisa v bazi, ki naj se naslednja obdela.

Kombinacija $\langle ime_zapisa \rangle . \langle ime_parametra \rangle$ se imenuje *process variable* (PV). Celoten koncept komunikacije v kontrolnem sistemu EPICS



Slika 4.3: Primer operatorskega vmesnika MEDM

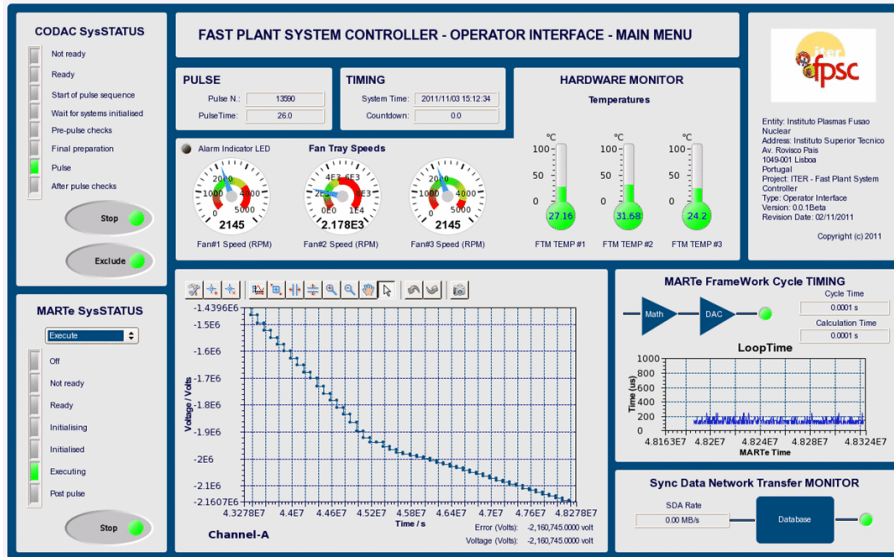
poteka z uporabo spremenljivk PV, ki se pravilno razrešijo preko protokola CA. Na tak način lahko na primer iz podatkovne baze enega krmilnika IOC dostopamo do vrednosti nekega parametra v podatkovni bazi drugega krmilnika IOC. Z uporabo spremenljivk PV se v obe smeri prenašajo tudi informacije med grafičnimi vmesniki ter podatkovnimi bazami.

4.2.3 Channel Access odjemalci

Channel Access odjemalci pridobivajo podatke iz podatkovne baze EPICS in jih obdelajo. Obdelava je lahko shranjevanje v podatkovno bazo za časovni pregled dogajanja v napravi, prikaz vrednosti operaterju, proženje alarmov, ipd.

OPI

Večina Channel Access odjemalcev je t.i. Operator Interface (OPI). To so grafični vmesniki narejeni za operaterje, ki delovanje naprave, kot je sinhronski pospeševalnik, nadzirajo iz kontrolne sobe. Ker je kontrolni sistem EPICS odprto-kodna programska oprema, so lahko grafični vmesniki razviti v poljubni tehnologiji. Kot del skupka programov kontrolnega sistema EPICS, pa se lahko uporabi Motif Editor and Display Manager (MEDM) [25] (Slika 4.3), ki pa je že dokaj zastarel in ga zato vse pogostejše nadomešča



Slika 4.4: Primer operatorskega vmesnika CSS

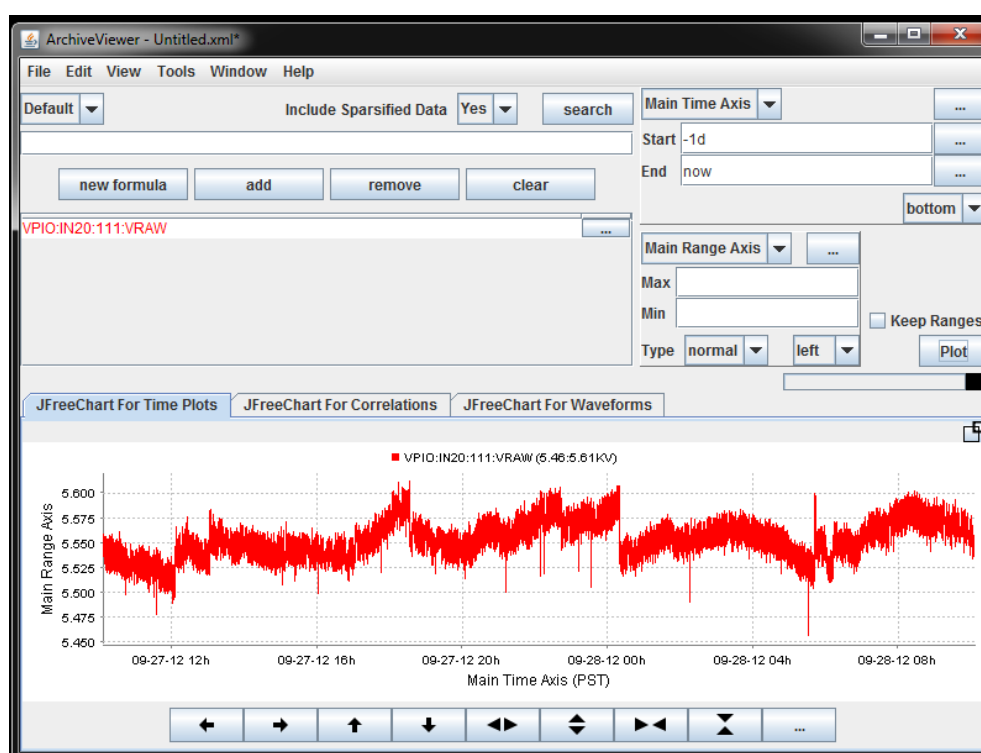
modernejši Control System Studio (CSS) [26] (Slika 4.4), ki je zasnovan na osnovi Eclipsea [27].

Channel Archiver

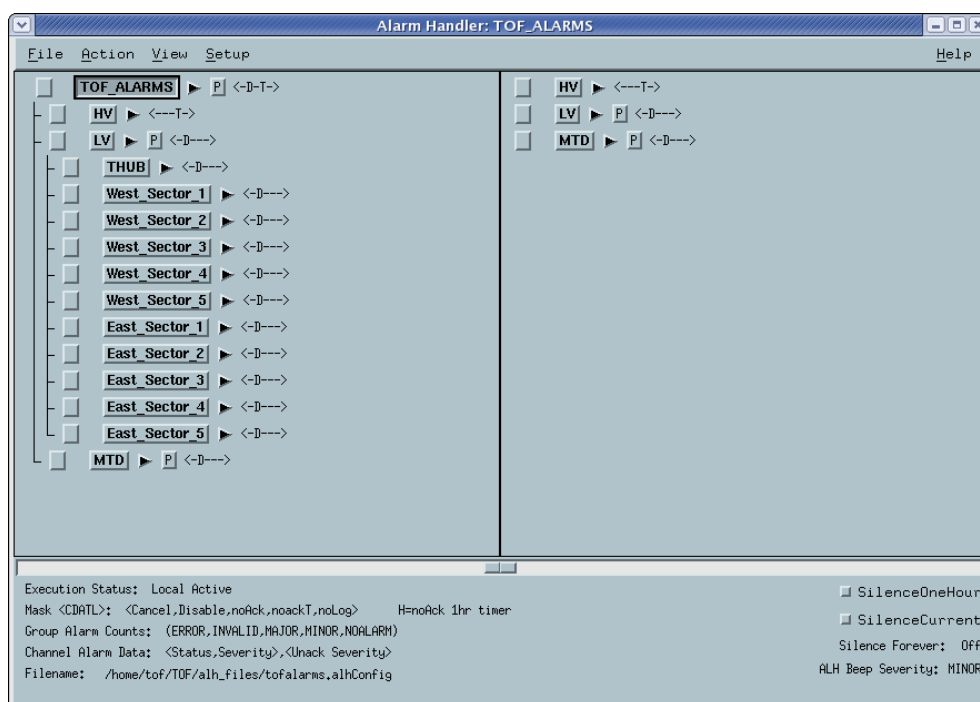
Channel Archiver [28] je programska oprema, razvita v sklopu kontrolnega sistema EPICS, ki omogoča arhiviranje velike količine podatkov pridobljenih iz različnih kanalov. S to informacijo lahko tehniki in operaterji odkrijejo določene nepravilnosti v delovanju naprave ali ugotovijo določene korelacije med parametri. Programska oprema omogoča dostop ostalega programja za pregledovanje shranjenih podatkov tako, da lahko razvijalec naredi namizno aplikacijo za pregled (Slika 4.5) ali spletno stran, ki podatke izpostavi na spletu.

Alarm Handler

Zapisi v podatkovni bazi EPICS navadno vsebujejo tudi polja, ki so namenjena sporočanju tega, ali je trenutni zapis v alarmu in kako resen je ta alarm.



Slika 4.5: Primer pregledovalnika podatkov shranjenih v Channel Archiverju



Slika 4.6: Primer pregledovalnika alarmov Alarm Handler

Alarm se navadno nastavi na strani zapisa glede na vrednost parametra VAL. Razvijalec podatkovne baze lahko nastavi meje, ki določajo kdaj je zapis v alarmu in kako resen je le-ta. Alarm Handler [29] je aplikacija, ki omogoča hierarhično predstavitev alarmov (Slika 4.6). Operator ima tako lahko hiter pregled nad tem ali so parametri v napravi izven dovoljenih vrednosti in možnost hitre reakcije v kolikor le-ti niso.

Poglavje 5

Konkretna implementacija

Da bi uporabnikom zagotovili stabilen žarek, se v v SSRF [4] uporablja pristop z vbrizgom elektronov v shranjevalni obroč, ki je ključen za visoko zmogljivostni svetlobni vir. Z uporabo te tehnike ima shranjevalni obroč eno vbrizgavanje elektronov vsakih nekaj minut in s tem zagotavlja kvaliteten ter konstanten žarek svetlobe. Ob zahtevi, da mora biti vsak skupek elektronov pod natančnim nadzorom in, da se razlika v toku žarka ohranja znotraj 1% toka, je realizacija zelo natančnih meritev skupkov elektronov ključnega pomena.

5.1 Analiza zahtev

V SSRF je tok žarka merjen večinoma z uporabo naprave DC current transducer (DCCT) in osciloskopa. DCCT meri povprečen tok žarka, vendar pa ni sposoben meriti naboja individualnega skupka. Za ta namen se je uporabljal osciloskop. Danes večina osciloskopov deluje na operacijskih sistemih Windows, zaradi česar prihaja do nesprejemljivih nestabilnosti in nefleksibilnosti pri programiranju.

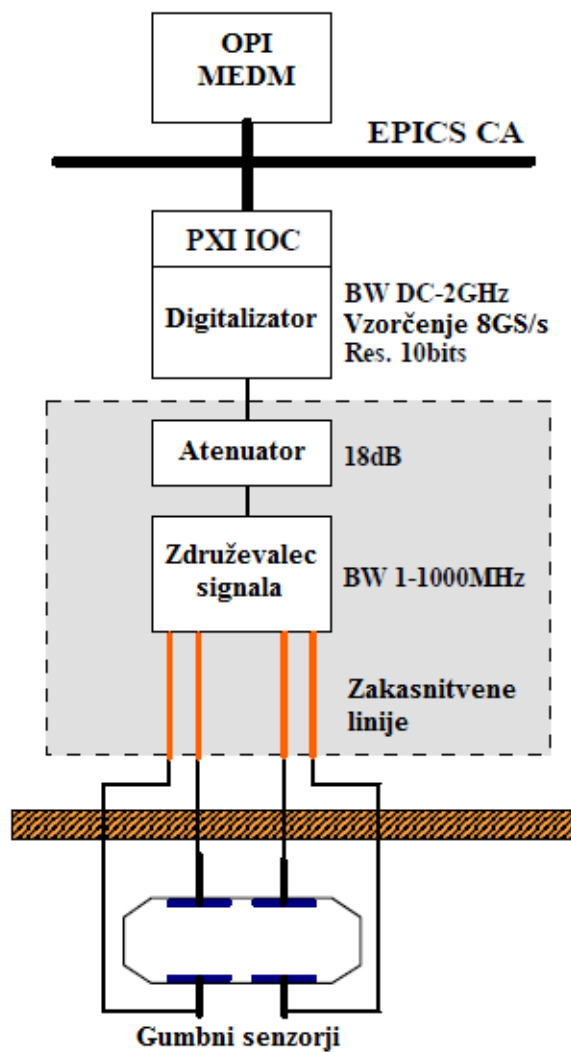
Tako kot ostali kontrolni sistemi na SSRF, sem tudi tukaj opisani sistem za računanje življenjske dobe skupkov realiziral z uporabo kontrolnega sistema EPICS, opisanega v Poglavju 4. Raziskovalci na področju pospeševalnikov

so navadno osredotočeni na aplikacije, ki se izvajajo v operacijskem sistemu Linux ali VxWorks. Tako lahko v primeru, da pride do problemov v EPICS-u, razvijalec lažje dobi več informacij od skupnosti, ki ta sistem že dolgo uporablja. Dodatno, visoko-vzorčni osciloskopi imajo večinoma 8-bitno resolucijo, kar predstavlja podrejenost v primerjavi s trenutno aktualnimi karticami za hitro vzorčenje.

Glede na ocene in izkušnje iz SLSA [6], je bila v SSRF za vzorčenje izbrana naprava podjetja Agilent Technologies. Digitalizacija žarkovnega signala visokih hitrosti je tako dosežena z uporabo dvo-kanalne Acqiris DC-252 CompactPCI kartice s hitrostjo vzorčenja 4 GS/s na vsakem kanalu oziroma 8GS/s pri združenih kanalih [5]. Z uporabo te naprave je enostavno v ohišje CompactPCI vgraditi računalnik in nanj namestiti operacijski sistem Linux, razviti potrebno podporo za komunikacijo z napravo in pridobivati podatke. DC-252 ima 10-bitno resolucijo, 2 GHz pasovno širino na analogni strani analogno digitalnega pretvornika in je sposobna prenašati podatke z vzdrževano hitrostjo do 400 MB/s do vgrajenega računalnika, kar dosega trenutne potrebe inštituta.

5.2 Strojna oprema

Naboj skupka elektrona je zaznan z uporabo monitorja pozicije žarka (BPM). Gre za standardni monitor s štirimi induktivnimi senzorskimi gumbi premera 10 mm, na katerih se ob prehodu skupka elektronov inducira napetost [30]. Monitorji BPM se sicer široko uporabljani za izračun pozicije žarka znotraj evakuirane cevi. Signali iz štirih gumbov so v našem primeru po zakasnitvenih linijah povezani v 4-v-1 združevalec signala, ki združi signale iz vseh štirih gumbov v en, pozicijsko neodvisen, signal. Zakasnitvene linije so nujno potrebne za prilagoditve zakasnitve signala, ker niso vsi gumbi na istem mestu. Od tu gre signal naprej v *attenuator*, kjer se njegova moč zmanjša in je tako primeren, da se uporabi kot vhod v digitalizator preko pretvornika iz analognega v digitalni signal (Slika 5.1).



Slika 5.1: Shema povezave strojne opreme v modulu za računanje življenjske dobe skupkov elektronov.

Modul za odčitavanje signala iz monitorjev BPM je prožen s pomočjo sistema za časovno usklajevanje kontrolnih sistemov na sinhrotronskem pospeševalniku.

5.3 Uporaba programske knjižnice AsynDriver

Asinhronska podpora gonilnikom (AsynDriver) [31] je splošno namensko orodje za dostop iz kode specifične napravi do nizkonivojskih komunikacijskih gonilnikov.

V preteklosti je bilo potrebno razvijalcu kontrolnega sistema EPICS, poleg gonilnikov, pisati tudi podporo po meri za zapis v EPICS podatkovni bazi, da je lahko le-ta komunicirala z napravo. Razvijalec je moral tudi sam vzpostaviti, vzdrževati in zaključiti komunikacijo z napravo. Z izidom EPICS verzije 3.14, je vse skupaj postalo še veliko bolj zapleteno, ker je nova verzija podpirala poganjanje kontrolnega sistema na Linux, Solaris, OS X, VxWorks in Windows operacijskih sistemih.

AsynDriver nam olajša delo, ker skrbi za serializacijo izmenjanih podatkov med podporo napravi in gonilniki namesto razvijalca. Skrbi za povezavo, dostop do deljenih virov in usklajuje dostop do gonilnikov. Razvijalcu ni potrebno skrbeti za komunikacijske protokole, olajša mu dostop do več naprav na isti liniji, itd.

Poleg tega ponuja AsynDriver lažji dostop za komunikacijo med zapisi v podatkovni bazi in gonilniki naprave, kar imenujemo podpora napravi. V podpori napravi lahko razvijalec implementira tudi specifične komunikacijske podrobnosti za določeno napravo in to skupaj z generičnim delom knjižnice AsynDriver uporabi za lažjo komunikacijo z napravo (Slika 5.2).



Slika 5.2: Umestitev knjižnice AsynDriver v programsko opremo EPICS IOC

5.4 Zgradba baze EPICS

V sklopu implementacije kontrolnega sistema sem razvil podatkovno bazo EPICS, ki vsebuje vse zapise, ki so potrebni za delovanje aplikacije in za dostop ter kontrolo operaterja:

- **RUN**
Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko operaterskega vmesnika (OPI) in mu omogoča, da požene ali zaustavi zajemanje podatkov in posledično računanje življenjske dobe skupkov elektronov.
- **RADIO_FREQ**
Zapis uporabljen za pridobivanje frekvence radio-frekvenčne komore preko CA [21] in podajanje le-te podpora naprave za izračun algoritma.
- **SLEEP**
Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča nastavitve

spanja v milisekundah programa med dvema izračunoma življenjske dobe skupkov.

- NCIRCLE

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča nastavitve števila obhodov skupkov, ki bodo vzorčeni za en izračun življenjske dobe skupkov.

- SCALE_CH_1

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča nastavitve referenčne napetosti v pretvorniku iz analognega v digitalen signal na prvem kanalu. V našem primeru imamo pretvornik, ki nam analogen signal pretvori v 10 bitno reprezentacijo. Imamo torej $2^{10} = 1024$ možnih vrednosti. Če je SCALE_CH_1 nastavljen na 5V to pomeni, da bo bilo 1024 vrednosti digitalnega signala enakomerno razporejenih v razponu od -5 do 5.

- SCALE_CH_2

Enako kot SCALE_CH_1, le za drugi kanal. Če operater uporablja le en kanal, se ta vrednost ignorira.

- DELAY

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča nastavitve časovne zakasnitve (v nanosekundah) zajemanja podatkov od sprožilca zaznanega iz sistema za časovno usklajevanje. Ta podatek potrebujemo zato, da se zajemanje podatkov vedno začne pri istem skupku elektronov.

- CSF

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča nastavitve faktorja med tokom izračunanim iz vrednosti monitorja BPM in realnim tokom zaznanim iz pretvornika DCCT. S pomočjo tega podatka je mogoče izračunati dejanski tok skupka elektronov in posledično realno življenjsko dobo.

- **DIVISION_POINT**

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča nastavitve številke skupka elektronov, kjer se, v kolikor uporabljamo dva kanala, združijo podatki iz prvega in drugega kanala. V primeru, da je to število 250, pomeni, da bomo uporabili za prvih 249 skupkov podatke iz prvega kanala, za skupke od števila 250 naprej pa podatke iz drugega kanala.

- **PTS_TO_CALC**

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča nastavitve števila meritev, ki so uporabljene za izračun življenjske dobe enega skupka elektronov.

- **PTS_TO_AVERAGE**

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča nastavitve števila izračunanih nabojev skupkov, ki se bodo uporabili za izračun enega, povprečenega naboja.

- **RAW_WF**

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča pregled izračunanega toka vseh skupkov elektronov.

- **CHARGE_WF**

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča pregled izračunanega naboja vseh skupkov elektronov.

- **LIFETIME_WF**

Zapis, ki je izpostavljen operaterju preko OPI in omogoča pregled izračunane življenjske dobe vseh skupkov elektronov.

5.5 Inicializacija in konfiguracija naprave

Konfiguracija naprave je potrebna pred vsakim začetkom izvajanja aplikacije in v primerih, ko se spremeni kateri izmed parametrov vzorčenja, kot je

število kanalov, ki naj se uporabijo, število vzorcev itd. Ob zagonu krmilnika IOC je tako potrebno napravo najprej inicializirati in nastaviti osnovne parametre za vzorčenje.

Najpomembnejši parametri so:

- Interval vzorčenja

Glede na število uporabljenih kanalov se interval vzorčenja Δt izračuna z uporabo maksimalne frekvence f_{max} po enačbi:

$$f_{\text{vzorčenja}} = \frac{f_{max}}{\text{število kanalov}} [\text{s}^{-1}] \quad (5.1)$$

$$\Delta t = \frac{1}{f_{\text{vzorčenja}}} [\text{s}] \quad (5.2)$$

- Število vzorcev

Število vzorcev je izračunano po enačbi:

$$\text{število vzorcev} = \frac{f_{\text{vzorčenja}} \times N_{\text{obhodov}} \times NumBunch_{max}}{f_{RF}} \quad (5.3)$$

kjer je N_{obhodov} vrednost prebrana iz zapisa NCIRCLE, $NumBunch_{max}$ maksimalno število skupkov v shranjevalnem obroču in f_{RF} frekvenca radio-frekvenčne komore. Število vzorcev mora biti natančno nastavljeno za poznejše računanje, ker je potrebno zagotoviti, da se vzorčenje vedno začne in konča pri istem skupku elektronov.

- Referenčna napetost za analogno-digitalni pretvornik za prvi kanal
Ta vrednost je prebrana iz zapisa SCALE_CH_1 v podatkovni bazi.
- Referenčna napetost za analogno-digitalni pretvornik za drugi kanal
Ta vrednost je prebrana iz zapisa SCALE_CH_2 v podatkovni bazi.
- Časovni zamik od sprožilca iz sistema za časovno usklajevanje.
Ta vrednost je prebrana iz zapisa DELAY v podatkovni bazi.
- Število kanalov
Ta vrednost, je nastavljena v skripti, ki požene IOC in se med izvajanjem ne more spremeniti.

Operater lahko med izvajanjem programa vse našteje vrednosti razen števila kanalov spreminja, vendar to povzroči ponovno konfiguracijo naprave. Ker po spremembi naprava zajema podatke na drugačen način in lahko izračunane vrednosti tokov zelo odstopajo, so stari, že zajeti podatki, ki se obdelujejo neveljavni in se izbrišejo. Računanje življenjske dobe skupkov elektronov se tako ob vsaki konfiguraciji naprave začne znova.

5.6 Vzorčenje podatkov in branje iz naprave

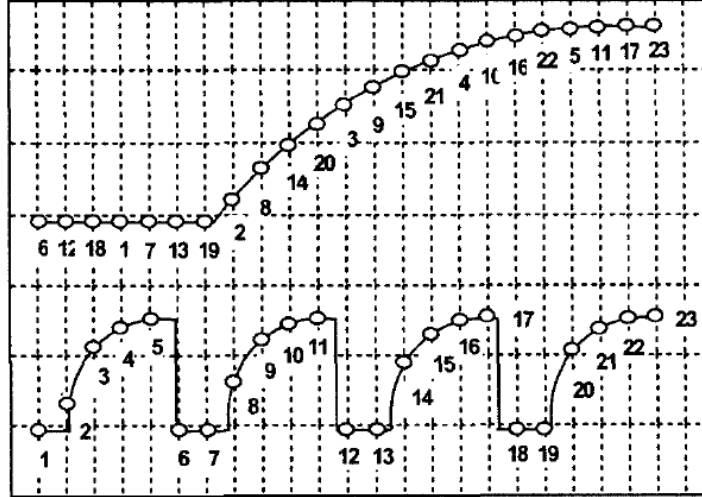
Ko operater nastavi vrednost zapisa RUN v podatkovni bazi na 1, se začne zajemanje in obdelava podatkov. To se izvaja v ločeni niti, za kar poskrbi AsyncDriver programska knjižnica (poglavje 5.3). Ločena nit je potrebna, da podpora napravi ne blokira komunikacije do podatkovne baze in se tako lahko vrednosti zapisov sproti posodablja.

V naslednjem koraku zahtevam podatke iz digitalizatorja. DC-252 digitalizator ima dovolj internega spomina za shranjevanje 10^6 10-bitnih vzorcev. Ti vzorci so najprej shranjeni v notranjem spominu digitalizatorja in le-ta ima pol sekunde časa, da podporo napravi obvesti o uspešnem dokončanju zajemanja. V kolikor se zajemanje podatkov konča uspešno, je naslednji korak branje podatkov iz digitalizatorja in nato obdelava le-teh.

Po končanju vzorčenja podatke preberem v podporo napravi, kjer so pripravljeni za nadaljnjo obdelavo.

5.7 Rekonstrukcija valovne oblike

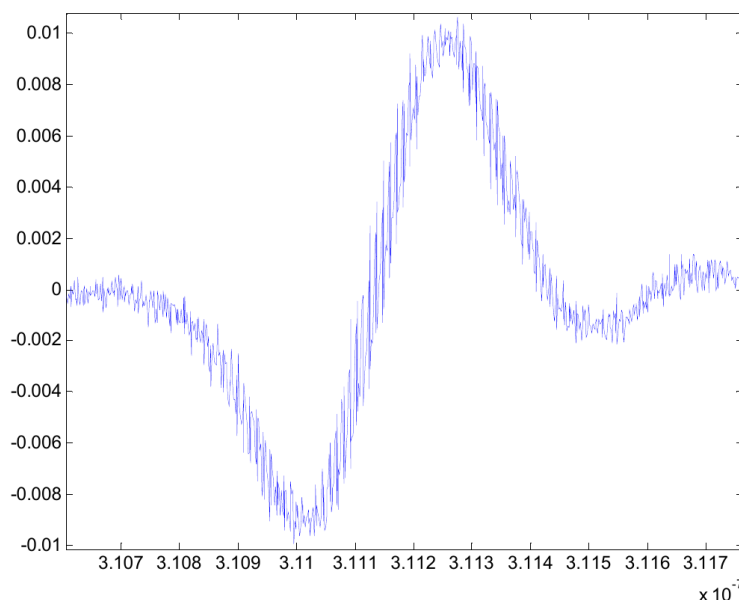
Glede na frekvenco radio-frekvenčne komore in dejstvo, da je časovni razmak med skupki zgolj 2 ns, časovni razmak med začetkom in koncem skupka pa le nekaj sto nanosekund, dobimo zelo malo vzorcev za vsak skupek. V primeru, da imamo združena kanala in vzorčimo z 8 GS/s, dobimo le 16 vzorcev na skupek, kar je občutno premalo za natančnejše računanje življenjske dobe. V običajnem primeru tako zajemam podatke 50 obhodov skupka pri frekvenci



Slika 5.3: Rekonstrukcija valovne oblike enega skupka

radio-frekvenčne komore 500M Hz na obeh kanalih skupaj, torej s frekvenco vzorčenja 8 GS/s. Skupno število vzorcev po enačbi (5.3) enega vzorčenja digitalizatorja je torej v tem primeru 576000.

Ko podatke preberem iz digitalizatorja, so sicer urejeni v enakem vrstnem redu kot so bili vzorčeni, vendar to pomeni, da imam v mojem primeru $50 \times 720 = 36000$ skupkov kjer ima vsak 16 vzorcev. Da bi dobil boljšo resolucijo vzorcev za posamezen skupek, je torej potrebno identificirati kateri vzorci pripadajo kateremu izmed 720 skupkov. Potrebno je najti vzorce prvega skupka v vseh obhodih, nato drugega, itd. Identificirane vzorce je potem potrebno združiti v nov seznam, kjer vsak skupek predstavlja, v mojem primeru, $16 \times 50 = 800$ vzorcev (Slika 5.3). Za namen združevanja vzorcev sem uporabil algoritem *urejanje z zlivanjem* [32], ki je bil za to aplikacijo razvit s strani inštituta SINAP.



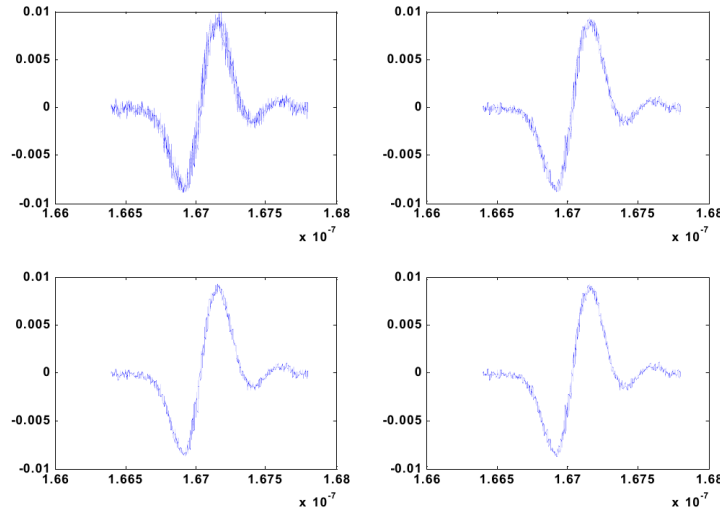
Slika 5.4: Valovna oblika konstruirana iz vzorcev, ki pripadajo enemu skupku pred glajenjem

5.7.1 Glajenje valovne oblike

Čeprav ima analogni *front-end* digitalizatorja pasovno širino 2GHz in bi ob normalni uporabi eliminiral višje frekvence, se v našem primeru to ne zgodi zaradi rekonstrukcije signala. V valovni obliki tako ostane kar nekaj šuma do katerega je prišlo ob meritvah, potovanju signala in vzorčenju ter je nezaželen za nadaljnjo obdelavo (Slika 5.4).

S strani inštituta SINAP je bil za ta namen razvit algoritem za glajenje valovne oblike. Algoritem je zgrajen na osnovi filtra Savitzky-Golay in za glajenje uporablja pet točkovni kubični polinom [33].

Iz Slike 5.5 je razvidno, da je opazna razlika po prvem glajenju. Med prvim in drugim glajenjem je ta razlika manjša, medtem ko jo med drugim in tretjim skorajda več ni. Na podlagi tega, se za glajenje valovne oblike uporablja dvakratno glajenje, ki zadošča zahtevam.



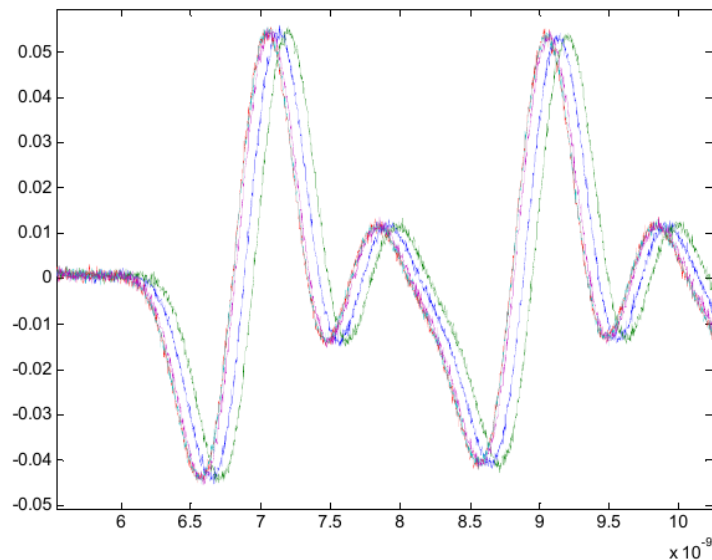
Slika 5.5: Zgoraj levo: pred glajenjem, zgoraj desno: enkratno glajenje, spodaj levo: dvakratno glajenje, spodaj desno: trikratno glajenje

5.7.2 Odstranjevanje šuma

V idealnih razmerah bi morala biti napetost inducirana na monitorju BPM v primeru, ko skupek elektronov ni prisoten enaka 0V. V realnem svetu pa se tudi v tem primeru na gumbih monitorja inducira določena napetost. To se imenuje šum ozadja in se mu je nemogoče izogniti. Da bi dobili čim boljše rezultate računanja življenjske dobe skupkov elektronov, je potrebno ta šum odstraniti.

Trenutno je v sinhrotronskem pospeševalniku SSRF maksimalno število skupkov 500, čeprav ima shranjevalni obroč kapaciteto za 720 skupkov. To pomeni, da imamo v shranjevalnem obroču 220 praznih prostorov, kjer ni prisotnosti skupkov elektronov in bi morala biti, v idealnih razmerah, inducirana napetost enaka 0V. Ker temu ni tako, lahko te prostore (vedra) uporabimo za izračun referenčnega šuma ozadja, ki je dodan realnemu signalu.

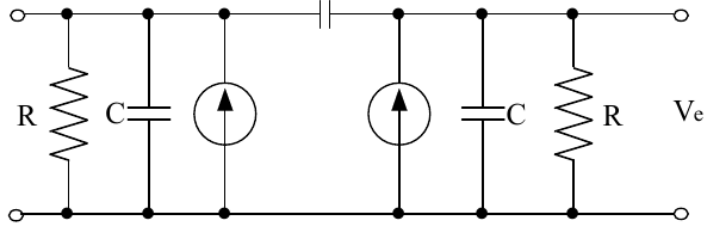
Šum ozadja eliminiram iz vzorcev tako, da izračunam kumulativno napetost v zadnjih petih vedrih in jo odštejem od vsakega vzorca.



Slika 5.6: Zamik valovnih oblik zaradi neusklajenosti radio-frekvence in sistema za časovno usklajevanje

5.7.3 Odstranjevanje časovnega zamika vzorčenja zaradi neusklajenosti radiofrekvence in sistema za časovno usklajevanje

Radio-frekvenca v radio-frekvenčni komori je dokaj stabilna, vendar ne popolnoma. Zaradi tega hitrost potovanja skupkov elektronov v shranjevalnem obroču ni vedno enaka. Na drugi strani pa je sistem za časovno usklajevanje fiksiran na 2 Hz. To pomeni, da obstaja možnost, da ne začnemo vzorčiti na vedno enakem mestu. Posledica tega je, da so ob večkratnem vzorčenju rekonstruirane valovne oblike zamaknjene (Slika 5.6). Maksimalni zamik valovnih oblik je $100 \sim 200\text{ps}$, kar v primerjavi z razmakom med skupki (2 ns) predstavlja približno 10% časa razmaka med skupki. Zaradi časovne optimizacije algoritma je pomembno, da ob končanju vzorčenja celotno valovno obliko le enkrat poravnam na način, da je znotraj vsakega skupka vzorec z najvišjo vrednostjo zelo blizu sredine. Za izračun naboja skupka moram



Slika 5.7: Shema vezja enega gumba monitorja BPM uporabljenega v SSRF [30]

vedeti na katerih mestih se nahajajo vzorci napetosti za posamezen skupek. S poravnavo celotne valovne oblike zagotovim, da se prvi vzorec skupka vedno nahaja na mestu, ki je večkratnik številu vzorcev, ki predstavljajo en skupek. Z enkratno poravnavo se tako tudi izognem poravnavi vzorcev za vsak skupek posebej in s tem zmanjšam čas izvajanja algoritma.

Za odstranjevanje zamika najprej naivno izračunam, kateri skupek elektronov naj se obravnava kot prvi. To je skupek, ki vsebuje vzorec, ki ima izmed vseh največjo vrednost. Nato izračunam za koliko pozicija vzorca z najvišjo vrednostjo odstopa od sredine vzorcev za ta skupek. To vrednost nato upoštevam za zamik vseh vzorcev naprej ali nazaj, odvisno od tega, ali je vrednost pozitivna ali negativna. Posledica tega je, da imam znotraj vzorcev enega skupka vzorec z najvišjo vrednostjo zelo blizu sredini vzorcev.

5.8 Izračun naboja skupka elektronov

5.8.1 Izračun toka iz valovne oblike napetosti

Na Sliki 5.7 je prikazana shema vezja enega gumba monitorja BPM uporabljenega v SSRF na katerem se na inducira napetost.

Napetost V_e na gumbih monitorja je torej inducirana po enačbi

$$V_e = \frac{R}{1 + j\omega R} \times I(t) \quad (5.4)$$

kjer je

$$I(t) = \frac{\Delta Q}{t} \quad (5.5)$$

Iz enačbe (5.4) je razvidno, da je med napetostjo in tokom linearna povezava. Iz tega lahko sklepamo, da bomo ob integraciji funkcije napetosti po času dobili spremembo toka v istem času pomnožen z nekim faktorjem.

Za namen numerične integracije sem uporabil trapezoidno pravilo [34] prikazano v enačbi

$$\int_a^b f(t) dt \approx (b - a) \frac{f(b) + f(a)}{2}. \quad (5.6)$$

Ker za dejanski izračun toka potrebujem tudi informacijo o faktorju s katerim sem tok v začetku množil, uporabim zapis v podatkovni bazi EPICS imenovan CSF, opisan v poglavju 5.4 ter množim s to vrednostjo.

5.8.2 Izračun naboja iz toka

Ko imamo izračunan tok vsakega skupka elektronov, potrebujemo le še pretvorbo toka v električni naboj. Uporabil sem enačbo (5.5) za izračun toka ter iz nje izrazil naboj

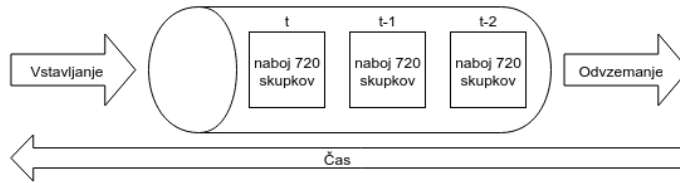
$$\Delta Q = I(t) \times t. \quad (5.7)$$

Manjkajoči podatek je čas trajanja obhoda enega skupka t , ki sem ga izračunal iz frekvence radio-frekvenčne komore (f_{RF}) in maksimalnega števila skupkov v shranjevalnem obroču ($NumBunch_{max}$) po enačbi

$$t = \frac{NumBunch_{MAX}}{f_{RF}}. \quad (5.8)$$

5.9 Računanje življenjske dobe skupkov elektronov

Postopki opisani v poglavjih 5.6, 5.7 ter 5.8 se izvedejo za vsak kanal ločeno. Vsak kanal sicer zajema podatke s frekvenco 4 GS/s, v kolikor uporabimo



Slika 5.8: Shema implementacije vrste FIFO

združen kanal pa s frekvenco 8 GS/s. Operater lahko v primeru, da vzorči na obeh kanalih, izbere mejo (DIVISION_POINT), ki pove do kje naj se uporabijo rezultati iz prvega kanala. Od te meje naprej se uporabijo rezultati iz drugega kanala, kot je opisano v poglavju 5.4. Da bi se v primeru uporabe obeh kanalov izognil dvakratnem računanju življenjske dobe vsakega skupka, prispevke kanalov najprej združim na točki izbrani iz strani operaterja. Obe nem združim tudi podatke o izmerjenem toku na monitorju BPM, saj je tudi ta podatek predstavljen operaterju v OPI-ju. V primeru, da se operator odloči le za uporabo enega kanala to ni potrebno.

5.9.1 Računanje povprečnega naboja skupkov elektronov

Za računanje povprečnega naboja skupkov elektronov sem razvil podatkovno strukturo na podlagi vrste *first in first out* (FIFO). Ko konec vsake meritve izračunam naboj vsakega skupka, le-tega vstavim na rep vrste FIFO. Na tak način dobim zgodovino izračunanih nabojev skupkov urejeno po času od najstarejšega do najmlajšega (Slika 5.8). S tem lahko dosežem računanje drsečega povprečja naboja vsakega skupka po času. Velikost FIFO vrste je določena glede na nastavitve, ki jo nastavi operater preko zapisa v podatkovni bazi imenovanega PTS_TO_AVERAGE, opisanega v poglavju 5.4.

Glavni namen tega pristopa je odstranitev šuma. Ta šum nastane, ker imajo vhodni podatki, tudi, če so bili glajeni, še vedno nekaj šuma, kar se odraža tudi pri izračunanem naboju vsakega skupka. Za samo delovanje algoritma računanje povprečja namesto uporabe najbolj aktualne vrednosti ne

predstavlja problema, saj se naboj skupka elektronov zmanjšuje zelo počasi in s tem ne izgubimo informacij.

Ko izračunam povprečno vrednost naboja za vsak skupek, podatke dodam v drugo FIFO vrsto, ki jo bom uporabljal za računanje življenjske dobe.

5.9.2 Računanje življenjske dobe skupkov elektronov

Potreba po ponovni uporabi FIFO vrste izhaja iz zahteve, da računanje aktualne vrednosti življenjske dobe posameznega skupka izvedem na podlagi zadnjih nekaj izračunanih povprečnih nabojev skupkov. Količina nabojev, ki jo vzamem v kalkulacijo, je določena s strani operaterja preko nastavitve vrednosti zapisa v podatkovni bazi PTS_TO_CALC opisanega v poglavju 5.4.

Zaradi narave vpliva sipanj, ki prispevajo k izgubi elektronov v skupku, življenjska doba s časom pada eksponentno [35]. Da bi torej lahko ocenili čez koliko časa v skupku ne bo nobenega elektrona (naboj bo nič), moramo najti funkcijo, ki se bo najboljše prilegala izračunanim nabojem za vsak skupek in poiskati čas v katerem bo ta funkcija manjša od neke vrednosti, ki je definirana v naprej.

Prileganje eksponentne funkcije na naboje skupkov

Da bi lahko izračunal življenjsko dobo skupka sem najprej poiskal enačbo eksponentne funkcije, ki se dobro prilega izračunom naboja. Ob podani splošni enačbi

$$y = Ae^{Bx}. \quad (5.9)$$

sem torej za dane podatke izračunal konstanto A, ki predstavlja začetno vrednost funkcije ter B, ki pove kako hitro funkcija pada.

Prvi izračunan naboj, ki ga vzamem, ima položaj na abscisni osi 0 in vrednost y_0 . Enačbo (5.9) lahko torej prevedem na

$$y = y_0e^{Bx}. \quad (5.10)$$

Ker eksponentna funkcija po definiciji ne more nikoli doseči vrednosti 0, je potrebno določiti število, ki predstavlja minimalno dovoljeno vrednost naboja v skupku. V primeru SSRF je to vrednost

$$y = \frac{1}{e}y_0, \quad (5.11)$$

kar je industrijski standard, ki jo lahko vstavim v enačbo (5.10) in dobim

$$\frac{1}{e}y_0 = y_0e^{Bx} \quad (5.12)$$

ter enačbo delim z začetno vrednostjo, kar da

$$\frac{1}{e} = e^{Bx}. \quad (5.13)$$

Ker vemo, da je

$$\frac{1}{e} = e^{-1} \quad (5.14)$$

lahko enačbo (5.13) prevedem na reševanje enačbe

$$Bx = -1. \quad (5.15)$$

Iz enačbe (5.15) torej izrazim x in dobim končno enačbo, ki jo je potrebno rešiti in sicer

$$x = -\frac{1}{B}. \quad (5.16)$$

Preostane torej izračun hitrosti padanja funkcije glede na dane vhodne podatke o naboju skozi čas. B sem izračunal po metodi najmanjših kvadratov [36] s sledečo enačbo

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \times \sum_{i=1}^n x_i y_i \ln y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \times \sum_{i=1}^n y_i \ln y_i}{\sum_{i=1}^n y_i \times \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i - \sum_{i=1}^n (x_i y_i)^2}. \quad (5.17)$$

Sedaj je potrebno le še dobljeno vrednost na abscisni osi pretvoriti v dejanski čas. Časovni razmak med izračunanimi naboji skupkov je v grobem

enak času, ko algoritem spi med dvema meritvama. Čas spanja v milisekundah nastavi operater in se prebere iz zapisa v podatkovni bazi imenovanega SLEEP opisanega v poglavju 5.4. Ko vrednost B izračunam po enačbi (5.17) in posledično po enačbi 5.16 še vrednost x , lahko izračunam življenjski čas skupka elektronov t_{life} . Življenjski čas se navadno izrazi v urah, zato je potrebno vredno zapisa SLEEP najprej prevesti na ure

$$t_{sleep} = \frac{SLEEP}{1000 \times 60 \times 60}. \quad (5.18)$$

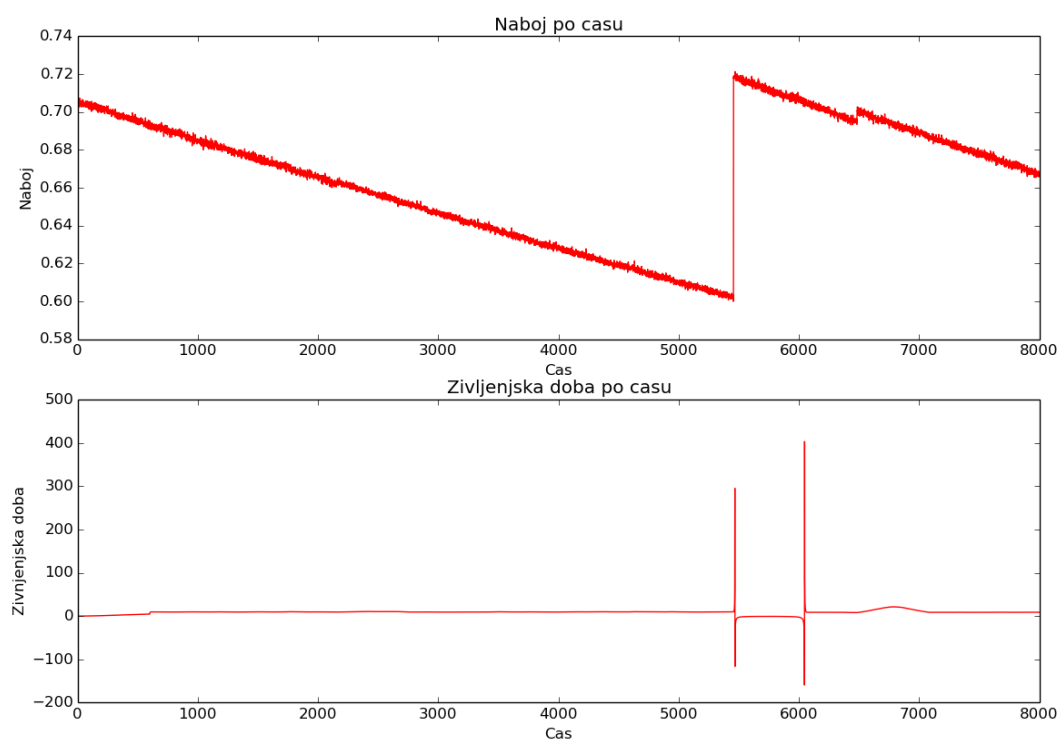
Sedaj lahko izračunam dejanski življenjski časa skupka elektronov, ki je

$$t_{life} = x \times t_{sleep}. \quad (5.19)$$

Na Sliki 5.9 je predstavljenih nekaj izračunov naboja enega skupka in iz njih izračunana življenjska doba. Iz slike je zelo dobro razviden vpliv vbrizga novih elektronov v skupek na naboj skupka. Posledično vpliva tudi na izračun življenjske dobe. Vsakič, ko se vbrizg zgodi, je namreč potrebno razveljaviti trenutne podatke, ki se uporabljajo za izračun življenjske dobe in znova začeti dodajati vrednosti naboja. To povzroči velika nihanja pri računanju življenjske dobe dokler ni dovolj podatkov, da se izračunana enačba eksponentne funkcije umiri.

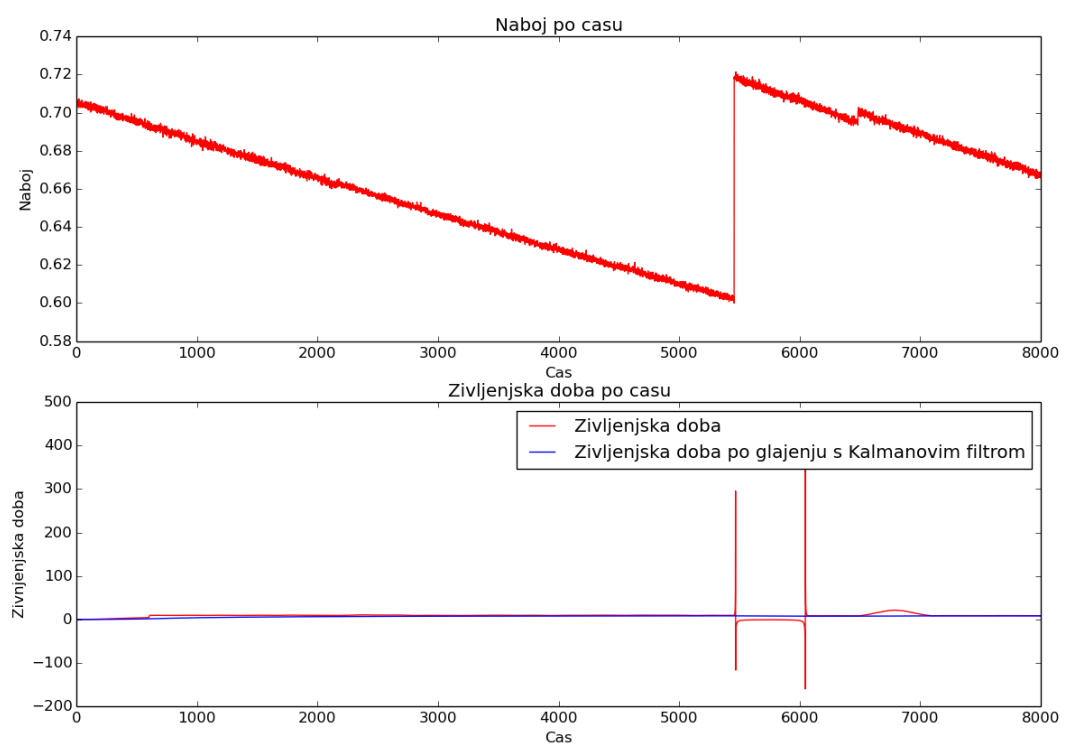
Kalmanov filter

Da bi se izognil špicam v grafu vidnim na Sliki 5.9, sem za glajenje napak do katerih pride ob premajhnem številu podatkov za stabilen izračun življenjske dobe, ob vsakem vbrizgu uporabil Kalmanov filter [37, 38]. Iz slike 5.9 je razvidno, da je med vbrizgi življenjska doba relativno linearna. Zato sem za za vhodne parametre v Kalmanov filter uporabil enačbo premice. Končni rezultat izračuna življenjske dobe enega skupka je viden na Sliki 5.10. Kot je iz slike razvidno sem z uporabo Kalmanovega filtra znatno zmanjšal vpliv vbrizga novih elektronov in napake, ki se zaradi tega pojavijo.



Slika 5.9: Zgoraj: naboj skupka skozi čas, spodaj: izračunana življenjska doba skozi čas

5.9. RAČUNANJE ŽIVLJENJSKE DOBE SKUPKOV ELEKTRONOV 45



Slika 5.10: Zgoraj: naboj skupka skozi čas, spodaj: izračunana življenjska doba skozi čas ter glajenje s Kalmanovim filtrom

Poglavje 6

Sklepne ugotovitve

V okviru magistrske naloge sem v sodelovanju s podjetjem Cosylab in kitajskim inštitutom SINAP razvil algoritem za izračun življenjske dobe skupkov elektronov v sinhrotronskem pospeševalniku SSRF. Razviti algoritem se izvaja na napravi za hitro vzorčenje (digitalizatorju) DC-252, podjetja Agilent Technologies. Celotno programsko rešitev sem vključil v kontrolni sistem EPICS, ki je glavni kontrolni sistem uporabljen na pospeševalniku SSRF in razvil grafični vmesnik za kontrolorje preko katerega lahko spremljajo rezultate ter nadzirajo potek izvajanja algoritma.

Informacije pridobljene z uporabo programa, ki sem ga razvil, so izrednega pomena za diagnostično skupino, katere glavna naloga je spremljanje žarka v sinhrotronskem pospeševalniku in zagotavljanje tem boljše in stabilnejše kakovosti sinhrotronske svetlobe.

Diagnostična skupina je, že preden sem razvil opisani program, imela informacijo o življenjski dobi celotnega žarka, ki je že sama po sebi zelo dober pokazatelj o kvaliteti le-tega. Ta podatek sem uporabil tudi za ovrednotenje mojih rezultatov saj mora biti, v primeru, da se moj program izvaja pravilno, izračunana življenjska doba enega skupka elektronov približno enaka življenjski dobi celotnega žarka, ki je izračunana z uporabo pretvornika DCCT. Po skupnem pregledu kode programa in rezultatov, smo s pomočjo kitajskih znanstvenikov ugotovili, da moj program ponuja zanesljive rezul-

tate. Glede na to, da ni potrebno, da se algoritem izvede v realnem času in, da je zahteva uporabnikov, da se nov zajem podatkov in njihova obdelava v povprečju izvede vsakih deset sekund, smo ugotovili, da je algoritem dovolj hiter glede na namen uporabe.

Glede na to, da je bil projekt uspešno zaključen in so bili s produktom uporabniki zelo zadovoljni, se program, ki sem ga razvil sedaj redno uporablja na sinhrotronskem pospeševalniku SSRF. Dodana vrednost moje implementacije je veliko bolj natančen vpogled v dogajanje v žarku elektronov v vakuumski cevi. Pred tem so znanstveniki poznali le življenjsko dobo celotnega žarka s čimer so sicer lahko zaznali napake v sistemu, vendar so le s težavo določili kdaj in kje se napaka pojavi. Glede na to, da moj program ponuja podatek o življenjski dobi vsakega izmed skupkov elektronov imajo znanstveniki informacijo z veliko večjo resolucijo. Tako lahko na primer ugotovijo morebitne napake pri vbrizgavanju novih elektronov v shranjevalni obroč ali napake na magnetih. Posledično lahko pospeševalnik SSRF sedaj ponuja kvalitetnejšo, intenzivnejšo in bolj konstantno svetlobo svojim strankam, ki na eksperimentalnih postajah postavljajo nove mejnike sodobne znanosti in odkrivajo nova zdravila ter materiale in še marsikaj drugega. Glede na to, da lahko sedaj odkrijejo več napak v shranjevalnem obroču, lahko ob odpravi le-teh zagotovijo daljši neprekinjeni čas obratovanja, kar je v svetu pospeševalnikov eden izmed glavnih pokazateljev kvalitete naprave in so si s tem še dodatno utrdili ugled v svetu sinhrotronskih pospeševalnikov.

Literatura

- [1] Epics home page.
URL <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [2] Cosylab spletna stran.
URL <http://www.cosylab.com>
- [3] Sinap spletna stran.
URL <http://english.sinap.cas.cn/>
- [4] Shanghai synchrotron radiation facility.
URL <http://e-ssrf.sinap.cas.cn/>
- [5] Agilent u1065a.
URL <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-7443EN.pdf?id=1306645>
- [6] Synchrotron light source australia.
URL <http://www.synchrotron.org.au/>
- [7] Swiss light source.
URL <http://www.psi.ch/sls/>
- [8] Diamond light source.
URL <http://www.diamond.ac.uk/>
- [9] Tutor vista.
URL <http://physics.tutorvista.com/modern-physics/synchrotron.html>

-
- [10] M. Pleško, Basics of accelerator physics for nonexperts, Neobjavljeno.
- [11] G. Pajor, Krmiljenje vakuumskega sistema predpospeševalnika avstralskega sinhrotrona, 2005.
- [12] P. Willmott, John Wiley and Sons, Ltd, 2011.
- [13] W. Welford, Taylor and Francis Group, 1986.
- [14] P. Willmott, Beamlines, John Wiley and Sons, Ltd, 2011, pp. 87–131.
- [15] S. K. R. M. M.A. Jebramcik, H. Huck, Study of the beam lifetime at the synchrotron light source delta, in: Proceedings of IPAC2014, 2014, pp. 222–224.
- [16] F. E. Rutherford, The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom, in: Philosophical Magazine, Vol. 21 of 6, 1911, pp. 669–688.
- [17] S. C. Leemann, Interplay of Touschek scattering, intrabeam scattering, and rf cavities in ultralow-emittance storage rings, Phys. Rev. ST Accel. Beams, volume = 17, issue = 5, pages = 050705, numpages = 7, year = 2014, month = May, publisher = American Physical Society, doi = 10.1103/PhysRevSTAB.17.050705, url = <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.17.050705>.
- [18] Y. H. H.-C. H. G. W. Boris Podobedov, Weixing Cheng, Nsls-ii beam lifetime measurements and modeling, in: Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, 2015, pp. 416–418.
- [19] Los Alamos National Laboratory.
URL <https://www.lanl.gov/>
- [20] Argonne National Laboratory.
URL <http://www.anl.gov/>

-
- [21] Channel access protocol specification.
URL <http://www.aps.anl.gov/epics/docs/CAproto.html>
- [22] Epics r3.14 channel access reference manual.
URL <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/8-docs/CAref.html>
- [23] A. J.-E. N. J. H. R. L. B. F. Martin R. Kraimer, Janet Anderson, Epics: Input / output controller application developer's guide, 2005.
- [24] Epics r3.14 record reference manual.
URL https://wiki-ext.aps.anl.gov/epics/index.php/RRM_3-14
- [25] J. Kenneth Evans, Medm refence manual, 2014.
URL <http://www.aps.anl.gov/epics/EpicsDocumentation/ExtensionsManuals/MEDM/MEDM.html>
- [26] Control system studio.
URL <http://controlsystemstudio.org/>
- [27] Eclipse.
URL <https://eclipse.org/>
- [28] Channel archiver manual.
URL <https://www.slac.stanford.edu/grp/lcls/controls/global/sw/epics/extensions/ChannelArchiver/manual.pdf>,
year={2006}, author={BobDalesio}
- [29] J. Anderson, Alarm handler user's guide, 2014.
URL <http://www.aps.anl.gov/epics/EpicsDocumentation/ExtensionsManuals/AlarmHandler/ALHUserGuide/ALHUserGuide.html>
- [30] C. Z.-C. Z. W.-M. a. L. Y.-B. ZHAO Guo-Bi, YUAN Ren-Xian, Development of button-type pickup for ssrf ring, Nuclear Science and Techniques 25 (6) (2014) 60103. doi:10.13538/j.1001-8042/nst.25.060103.

- URL http://www.j.sinap.ac.cn/nst/EN/abstract/article_520.shtml
- [31] E. N. Marty Kraimer, M. Rivers, asyndriver: Asynchronous driver support, 2011.
URL <http://www.aps.anl.gov/epics/modules/soft/asyn/R4-18/asynDriver.html>
- [32] S. Qin, Merge sort algorithm.
- [33] G. M. J. E. Savitzky, A., Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, in: Analytical Chemistry, Vol. 36, 1964, pp. 1627–1639.
- [34] J. Stoer, R. Bulirsch, R. H. Bartels, W. Gautschi, C. Witzgall, Introduction to numerical analysis, Texts in applied mathematics, Springer, New York, 2002.
URL <http://opac.inria.fr/record=b1098819>
- [35] Y. G. H. Saisho, Applications of synchrotron radiation to materials analysis, in: Applications of Synchrotron Radiation to Materials Analysis, 1996, p. 45.
- [36] P. Bickel, K. Doksum, Mathematical Statistics: Basic Ideas and Selected Topics, Holden-Day, 1977.
- [37] G. Welch, G. Bishop, An introduction to the kalman filter.
- [38] U. L. Sašo Skube, Patricio Bulić, Logarithmic arithmetic for low-power adaptive-systems design.